

# THE DESIGN OF N-TYPE FEEDTHROUGH FOR HOM COUPLER FOR cERL INJECTOR CAVITY

Ken Watanabe <sup>#,A)</sup>, Eiji Kako <sup>A)</sup>, Shuichi Noguchi <sup>A)</sup>, Toshio Shishido <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

The injector cryomodule for cERL is under developing at KEK. This cryomodule with three L-band 2-cell cavities was constructed at June 2012. Three 2-cell cavities with five HOM couplers were fabricated at May 2011. The vertical tests of these cavities were made from June 2011 to Mar 2012, and the rf feedthroughs with high thermal conductivity for HOM coupler were also developed to achieve 12.5 MV/m operation at CW in cryomodule. The results of vertical test of the 2-cell cavities with feedthrough of HOM coupler will be reported in this report.

## cERL 入射器空洞 HOM coupler 用高熱伝導 N 型フィードスルーの開発

### 1. はじめに

KEK で開発が進められている cERL 入射器用超伝導加速空洞システムは 2 セル空洞が 3 台納められたクライオモジュールを用いて、電子銃で生成した 10 mA の CW ビームを 5 MeV 程度まで加速する[1]。空洞あたりの加速電界は 7.5-12.5 MV/m となり、必要とする入力パワーは~30 kW となる。運転周波数は 1300MHz、運転モードは CW、運転温度は 2K である。入射器空洞の高次モード減衰器（以下、HOM coupler）は TESLA style の同軸型 HOM coupler を採用したことからクライオモジュール運転時の HOM coupler 周りの発熱を抑制することが課題となっていた。加速モード励振時における発熱箇所は HOM coupler 自身と HOM パワー取り出しのためのフィードスルーである。HOM coupler については TESLA-like 空洞の HOM coupler をベースに RF 設計を行っており、内導体に High Pass filter、突起を設けることで HOM coupler 全体に流れる表面電流値を 1/2 まで低減させ、RF 損失を 1/4 とした[2]。両ビームパイプに計 5 機の改良型 HOM coupler を装着したプロトタイプ空洞および実機空洞のたて測定の結果、2011 年 6 月の段階で目標値である運転電界 12.5 MV/m で問題となる発熱箇所は HOM パワーの取り出しに用いているフィードスルーに絞られるに到った[3]。

これまで使用してきたフィードスルーはパルス運転で使用されてきたものであり、アルミナ製高周波窓を用いた N 型フィードスルー（Kyocera N-R type）である。内導体および外導体を構成する材料は Kovar、ニオブ製アンテナと内導体の接合方法は螺子式である。フィードスルーの発熱を抑制するためには、伝熱特性を向上させる必要がある。改良の方針は、内導体、外導体に伝熱特性の良いかつ非磁性の材料を使用すること、ニオブ製アンテナと内導

体との接合方式の変更である。高周波窓の材料と RF 設計は変更していない。フィードスルーの耐電圧試験は実機空洞 3 台のたて測定と同時に行った。本報告では、その試験結果について報告する。

### 2. HOM coupler とフィードスルーの構成

HOM coupler の構成を図 1、フィードスルーの構成を図 2 に示す。また、フィードスルーの材料構成を表 1 にまとめる。

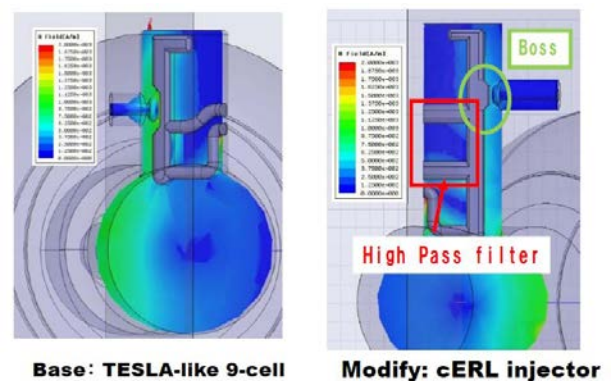


図 1 : HOM coupler

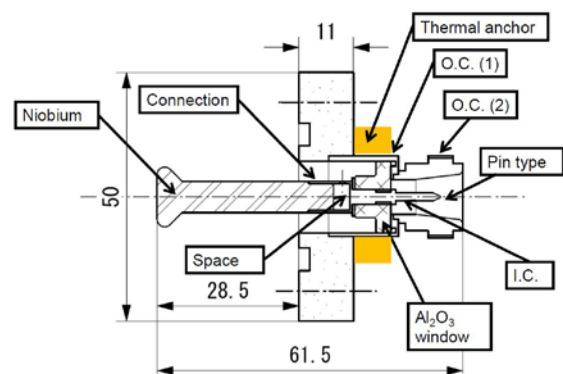


図 2 : フィードスルーの構成

表 1 : フィードスルーの材料構成

Type	Inner conductor	Outer Conductor	Connection (Space)	Pin Type
Type 0 Normal	Kovar	1:Kovar 2:Kovar	Screw (vacuum)	Female
Type 0 Modify	Kovar	1:Kovar 2:Kovar	Screw (In block)	Female
Type 1	Mo	1:Kovar 2:Kovar	Brazing (vacuum)	Female
Type 2	Mo	1:Cu 2:SUS316L	Brazing (vacuum)	Female
Type 2 Modify	Mo	1:Cu 2:SUS316L	Brazing (vacuum)	Male

Type 0 Normal は TESLA-like 空洞 (パルス運転) で使用されていたものであり、ニオブ製アンテナを内導体に螺子で接続する方式である。このため、フィードスルーとニオブ製アンテナを個別に表面処理・洗浄を行うことができる (図 3) [4]。Type 0 Modify は内導体とニオブ製アンテナの接合部の隙間をインジウムブロックで埋め、伝熱特性の改善を図ったものである。Type 1 は内導体を Mo に、接合方法をロウ付けに変更したものである。Type 2 は内導体を Mo、接合方法をロウ付け、高周波窓と接している部分の外導体は無酸素銅、N コネクタ部を SUS316L としている。Type 2 の N コネクタ部をオスピンにしたものを Type 2 Modify と呼んでいる。表 2 に常温と 4.2K における各材料の熱伝導率をまとめる。図 4 に製作したフィードスルーを示す。また、RF ケーブルを接続して、たて測定を行ったところ、Mo 製のメスピンの勘合部に図 5 のような破損が見られた。これは製作したすべてのフィードスルーに見られたため、最終的にはフィードスルーのタイプをオスピンとした。RF ケーブルとの接続はリバースタイプの L-adapter を用いて対応する。

表 2 : 各材料の熱伝導率[5]

材料	熱伝導率 [W/(m・K)]	
	常温	4.2 K
銅	401	840
SUS316L	16.7	0.26
Kovar	17	No data
ニオブ	53.7	27
モリブデン	138	66
アルミナ	24 - 32	No data

### 3. フィードスルーの表面処理

フィードスルーの表面処理方法を以下にまとめる。フィードスルーのニオブアンテナ部は表面の細かい傷および製作時 (ロウ付け、フランジ溶接時) に表面に付着した異物を除去する必要がある。また、内導体全体の表皮抵抗を最小にするために、内導体とニオブアンテナの接合部から染み出したロウ材の除

去も必要であることが試験中に判明した。最終的には下記の手順で製作後のフィードスルーの手入れおよび表面処理を行った。機械研磨により接合部から染み出したロウ材の除去とニオブアンテナ部の鏡面化を機械研磨にて行う。その後、ニオブアンテナ部全体に対して化学研磨 (5 分間) を行う。化学研磨後、脱脂剤 (FM-20) を用いた物理洗浄および超音波洗浄を行い、組み立てまでクリーンルーム内で保管する。

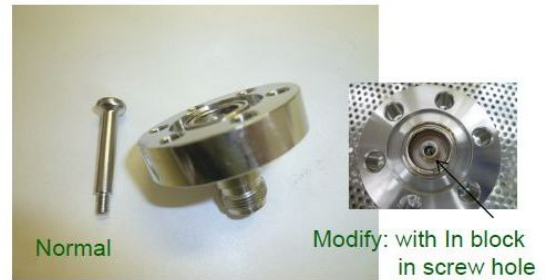
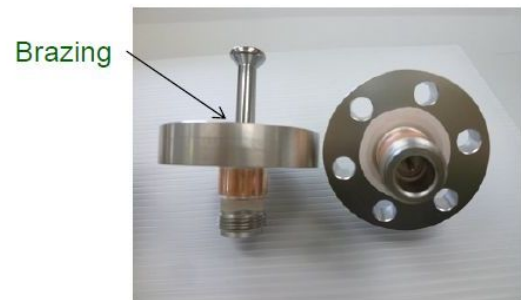


図 3 : Type 0 Normal と Type 0 Modify



(a) Type 1 と Type 2



(b) Type 2 Modify

図 4 : 製作したフィードスルー

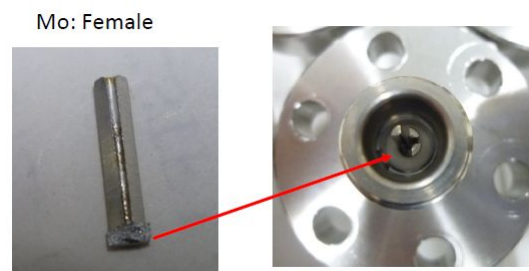


図 5 : メスピンの勘合部の破損

#### 4. 耐電圧・耐電力特性の測定

HOM coupler とフィードスルーの耐電圧特性およびフィードスルーの耐電力特性を評価するために、実機 3 空洞 (#3、#4、#5) およびプロトタイプ空洞 (#2) を含めた計 4 空洞を用いて、計 8 回のたて測定を 2010 年から 2012 年にかけて行った。

##### 4.1 空洞の表面処理、空洞補修、チューニング

空洞は製作後、パルク EP (Electro polish : 研磨量 105  $\mu\text{m}$ )、アニール、周波数調整、最終 EP (5~30  $\mu\text{m}$ )、リンス工程、組み立て、ベーキング (100~120°C、48 時間)、たて測定の順で試験した。また、製作後からの各工程間には空洞内面の光学検査を行っており、空洞性能を制限するような幾何学的欠陥が発見された場合、その都度、局所機械研磨による補修が行われる。補修の際、補修箇所は鏡面仕上げとし、洗浄後、最終 EP のみでたて測定という工程を採用している[6]。空洞補修は #3 空洞の赤道部 #4 空洞のアイリス・ビームパイプ部の溶接欠陥について行った。#3、#4、#5 空洞の周波数調整については、クライオモジュールへインストールされ、ビーム加速に使用されるため、2K (真空) の状態で 1299.5MHz $\pm$ 0.1MHz となるように調整している。また、たて測定時には HOM coupler にフィードスルーを取り付けて行うため、Notch filter の加速モードに対するチューニングを取る必要がある。チューニングは空洞をたて測定用スタンドへ移動、取り付け後にいった。常温 (真空) における加速モードの周波数 (1297.3 MHz) に対して、透過電力が最小になるように調整した。図 6 に調整方法を示す。

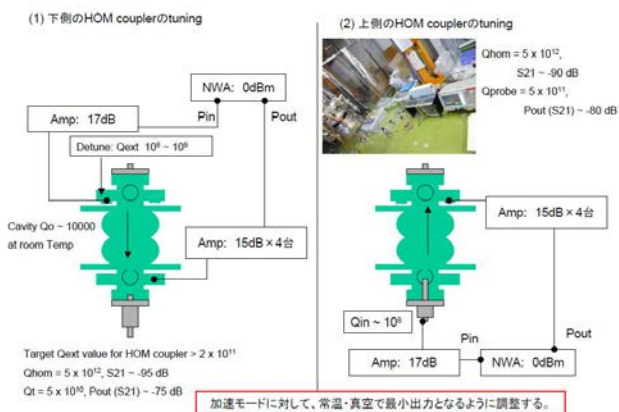


図 6 : 加速モードに対する HOM coupler の調整

##### 4.2 たて測定のセットアップ

HOM coupler とビームパイプはヘリウムジャケットの外側にあるため、クライオモジュール運転状態では、サーマルアンカーによる伝熱のみで冷却される。一方、たて測定では加速空洞の周辺は 2K の超流動ヘリウムで満たされており、この場合、クライオモジュール運転状態に対して冷却条件が良い。したがって、たて測定 (完全に He に浸った状態) で目標電界である 12.5 MV/m 以上を達成しても実機に

使用できるとは言い難い。このような場合、CHECIA[7]のような試験設備を用いるべきであるが、現状、KEK はそのようなシステムを所持していない。これゆえ、たて測定のセットアップで、できる限り実機の運転に近い状態を作り出す工夫を行い、その状態で耐電圧特性を調べることが必要であると考える。図 7 に耐電圧特性測定時のセットアップを示す。ヘリウムの液面とガスのフローレートをモニター・制御することで、上側のビームパイプおよび 2 機の HOM coupler (フィードスルー、接続されている RF cable) のみをヘリウム液面から出し、その状態で維持可能な電界強度を測定した。この際、冷却系のバルブを微調整することでクライオスタット中の圧力 (3kPa) を維持し、かつ、フローレートを出来る限り最小 (10  $\text{m}^3/\text{hour}$  以下) とし、気体分子による対流の影響を極力抑えた。また、フィードスルーと HOM coupler の外導体には銅製サーマルアンカーを設置しており、2K ヘリウムから直接取っている。なお、フィードスルーに設置したサーマルアンカーのブレード線の断面積は 60  $\text{mm}^2$  である。

HOM coupler とフィードスルーの発熱は外面に設置した温度センサーと HOM coupler の Qext の変化から検出した。He 中ではフィードスルーの発熱を外面の温度変化から検出することは難しく、この場合、Qext の変化を常時モニターすることでクエンチしたフィードスルーを特定することができる。

測定の手順としては、2K へ冷却後、

- ① He 中にて維持可能な最大電界を測定する。(TM010- $\pi$ 、TM010- $\pi/2$ )
- ② 維持可能な最大電界をキープした状態でヘリウムの液面を下げっていく。
- ③ He 外にて維持可能な最大電界を測定する。

である。

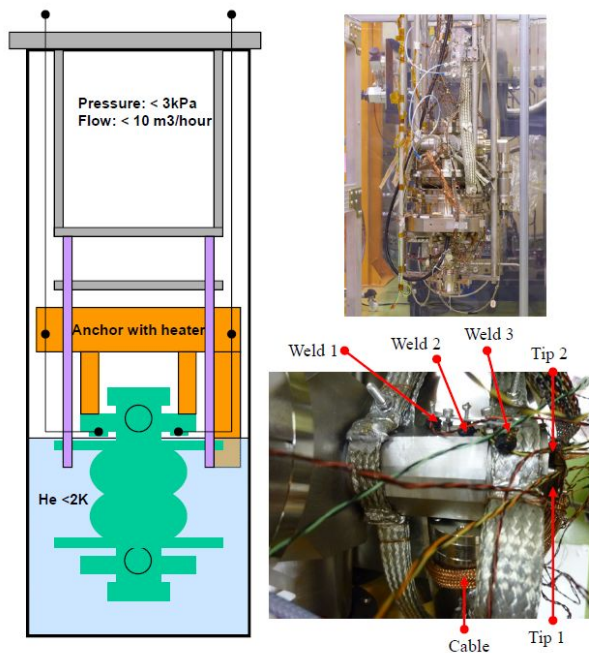


図 7 : たて測定のセットアップ

表 3 : たて測定および耐電圧特性の測定結果

Test	Feedthrough	Eacc [MV/m] Sustainable field at CW		Eacc Max [MV/m] (F.E. onset) Cause of limitation	Rres [nano-Ohm]	Recovery time after quench at feedthrough in Liq He
		Inside Liq. He	Outside Liq. He			
#2 cavity 4 <sup>th</sup> Oct/14/2010	Type 0 (Normal)	18	13 Quench at feedthrough	42.6 (31) Quench at feedthrough	38.0	~ 15 min
#3 cavity 1 <sup>st</sup> June/08/2011	Type 0 (Modify)	30.3	25 Quench at feedthrough	30.3 (26) Quench by defect	31.1	~ 2 min
#4 cavity 1 <sup>st</sup> 20/Sep/2011	Type 1	12	5 Quench at feedthrough	20.3 (No F.E.) Quench at feedthrough	47.8	~ 20 sec
#5 cavity 1 <sup>st</sup> 04/Oct/2011	Type 1 (Improved Surface treatment)	16.5	12 Quench at feedthrough	28.8 (28) Quench at feedthrough	40.0	~ 20 sec
#4 cavity 3 <sup>rd</sup> Dec/13/2011	Type 1 (Remove a brazing material)	20.5	7.5 Quench at feedthrough (Reduce a area of thermal anchor)	26.7 (No F.E.) Quench at feedthrough	34.4	~ 20 sec
#3 cavity 2 <sup>nd</sup> Nov/01/2011	Type 2	>33.4	31.9 Quench at HOM body	33.4 (26) Quench: Self pulse	34.6	Unknown No quench at Max field
#5 cavity 2 <sup>nd</sup> Nov/29/2011	Type 2	>30.6	28.2 Quench at HOM body	30.6 (21) Quench: Self pulse	36.6	Unknown No quench at Max field
#2 cavity 5 <sup>th</sup> Mar/06/2012	Type 2 (Male pin)	>50.4	Not Meas.	50.4 (50) Without quench. RF power limit.	27.4	Unknown No quench at Max field

### 4.3 測定結果

たて測定の結果を表 3 に、空洞パラメータを表 4 に示す。図 8 に各タイプの Qo-Eacc カーブを示す。試験は Type 0 から始まり、Type 1 を用いてフィードスルーの表面処理の条件だし、Type 2 の試験の順で行った。残留抵抗値の約 20 nano-ohm 分はビームパイプの SUS 端板の影響によるものである。

Type 0 Modify では簡単な工夫であったが、耐電圧、リカバリー時間に大きな改善が見られた。

Type 1 における初めの 2 回の試験では、ロウ材の除去およびニオブ面に対する機械研磨を行わず化学研磨のみで対応した。1 回目は表面電流負荷の大きいニオブ製アンテナ先端のみ、2 回目はニオブ表面全体を化学研磨した。3 回目は、内導体接合部のロウ材の除去およびニオブ表面の機械研磨後に化学研磨を行った。ニオブ表面の処理領域、ロウ材の除去などにより、残留抵抗 (Rres) および耐電圧特性に改善が見られた。これからニオブアンテナの表面状態も残留抵抗に大きく寄与することが分かる。リカバリー時間については、表面処理方法に依存せず一定であった。内導体の材料変更に伴い、飛躍的に改善した。

Type 2 では、Type 1 の 3 回目に行った表面処理方法を用いてフィードスルーの準備を行った。3 回行ったいずれの試験でも、30 MV/m を超える電界強度においてフィードスルーのクエンチは観測されなかった。また、ヘリウム液面から出た状態では、HOM coupler の外導体の温度上昇により 30 MV/m

付近で性能が制限された。#2 空洞を用いた測定では、電界強度 50 MV/m を達成し、かつ、最大電界においてフィードスルーのクエンチは観測されなかった。このとき、フィードスルーのニオブ製アンテナ先端に流れる表面電流値は約 7000 A/m であることが計算より見積もられ、(15MV/m のとき約 2000 A/m)。Type 2 へ改良したことにより少なくとも 8.5 倍程度冷却能力が改善されたことになる。また、電界強度 50.4 MV/m のときにセル赤道部に発生した磁界強度は空洞パラメータから評価すると 2127 Qe である。

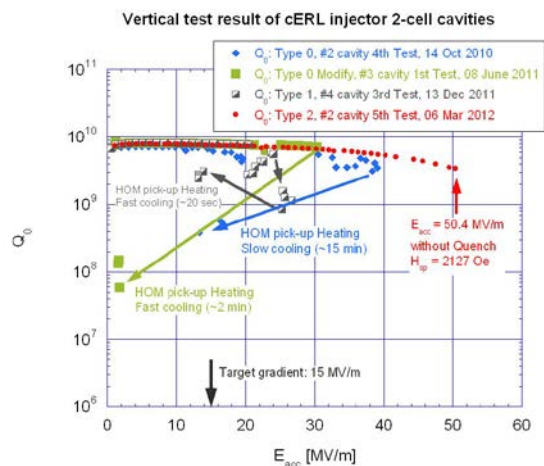


図 8 : Qo-Eacc カーブ

表 4 : 空洞パラメータ [8]

	cERL 2-cell cavity (KEK)
Frequency	1300 MHz
R/Q	204.0
G	287.8
Esp/Eacc	2.25
Hsp/Eacc [Qe/MV/m]	42.2
K (coupling)	1.94
L (effect.)	0.23 m/cavity
Iris diameter	70 mm
BP diameter	88 mm
Other	赤道部の磁場強度 50 MV/m -> 2110 Oe

一方、フィードスルーに掛かる負荷は加速モードの電圧負荷に加え、ビーム通過時に誘起された HOM パワー取り出しによる RF 損失の負荷も加わる。耐電力特性はパスバンドモードを使用することで行える。HOM coupler の Notch filter のバンド幅は約 5MHz ある。パスバンドである  $TM_{010-\pi/2}$  の周波数は  $\pi$  モードに対して 13 MHz 低いことから、HOM coupler の  $\pi/2$  に対する  $Q_{ext}$  は、空洞の  $Q_0$  とほぼ同じ  $10^{10}$  台となる。これより電圧負荷に加え、数 Watt から数十 Watt の電力が HOM coupler から出力されることになり、これを利用して耐電力特性を評価できる。クエンチ箇所は耐電圧試験のときと同じように  $Q_{ext}$  の変化から同定した。表 5 にパスバンドに対する  $Q_{ext}$  と HOM coupler からの出力電力の差をまとめる。表 6 に耐電力試験の結果をまとめる。Type 2 では 1 本あたり 13 Watt (25MV/m の電界負荷) の透過電力まで耐えられることが分かった。

表 5 : パスバンドに対する  $Q_{ext}$  と透過電力の変化 (例)

	$TM_{010-\pi}$ At 30 MV/m	$TM_{010-\pi/2}$ At 20 MV/m
Frequency	1299.956 MHz	1286.963 MHz
Monitor $Q_{ext}$ Pout: 20 or 30 MV/m	$3.8 \times 10^{11}$ 0.623 [W]	$2.5 \times 10^{11}$ 0.425 [W]
HOM1 $Q_{ext}$ Pout: 20 or 30 MV/m	$7.2 \times 10^{11}$ 0.318 [W]	$1.2 \times 10^{10}$ 8.21 [W]
HOM2 $Q_{ext}$ Pout: 20 or 30 MV/m	$1.7 \times 10^{13}$ 0.013 [W]	$2.9 \times 10^{10}$ 3.57 [W]
HOM3 $Q_{ext}$ Pout: 20 or 30 MV/m	$5.8 \times 10^{13}$ 0.004 [W]	$1.9 \times 10^{10}$ 5.57 [W]
HOM4 $Q_{ext}$ Pout: 20 or 30 MV/m	$2.2 \times 10^{12}$ 0.010 [W]	$2.1 \times 10^{10}$ 4.88 [W]
HOM5 $Q_{ext}$ Pout: 20 or 30 MV/m	$3.8 \times 10^{14}$ 0.0005 [W]	$1.5 \times 10^{10}$ 7.08 [W]

表 6 : パスバンド測定の結果 (耐電力特性)

Feedthrough	Eacc, Output power / feedthrough (In liq. He)
Type 0 Normal	11 MV/m, 3 [W]
Type 0 Modify	20 MV/m, 8 [W]
Type 2	25 MV/m, 13 [W]

表 7 : 実機空洞 3 台の最終状態

Cavity	Frequency (at 2K) (Field flatness)	Eacc Max [MV/m]	F.E. onset [MV/m]
#3	1299.533 MHz (90.3 %)	33.4	26
#4	1299.517 MHz (99.4 %)	26.7	No emission at Max field
#5	1299.427 MHz (96.9 %)	30.6	21

表 7 にクライオモジュールへインストールする前の空洞の最終状態をまとめる。いずれの空洞も目標電界である 12.5 MV/m をフィールドエミッション無しで達成している。たて測定時に装着したフィードスルーはいずれもメスピンであることから、連結化の作業時に Type 2 Modify へすべて交換した。

### まとめ・今後の予定

2012 年 6 月にクライオモジュールが完成し、冷凍機との接続後の 2012 年 12 月に High Power 試験を予定している。クライオモジュール状態で行われる High Power 試験の結果から、今回試みた、たて測定環境化における耐電圧・耐電力特性の評価方法の正当性および誤差が分かる。High Power 試験の結果に期待したい。

### 参考文献

- [1] S. Sakanaka, et al., "Status of ERL and cERL projects in Japan", proceedings of Linac10 in Tsukuba Japan, September, 12-17, 2010, TUP004.
- [2] K. Watanabe, et al., "New HOM coupler Design for ERL Injector at KEK", Proceedings of 13-th SRF Workshop, Peking University, Beijing, China, (2007).
- [3] K. Watanabe, et al., "Status of Development of the cERL superconducting Injector Linac", proceedings of Linac10 in Tsukuba Japan, September, 12-17, 2010, TUP005.
- [4] "NEW HOM COUPLER DESIGN FOR ILC SUPERCONDUCTING CAVITY", NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH, K. Watanabe, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 595 (2008) 299-311
- [5] 理科年表、真空ハンドブック、低温ハンドブック
- [6] K. Watanabe, et al., "Cavity Inspection and Repair Techniques", proceedings of SRF2011 in Chicago USA, July, 25-29, 2011, WEIOB02.
- [7] A. Matheisen, et al., "Activities on RF Superconductivity at DESY", proceedings of the 1995 Workshop on RF Superconductivity, Gif-sur-Yvette, France, srf95a06.
- [8] <http://ccdb4fs.kek.jp/tiff/2007/0724/0724007.pdf>